



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA



GRADO EN INGENIERÍA DEL SOFTWARE

Modelo semántico para la integración y análisis de imágenes multiespectrales de satélite y sus metadatos

Semantic model for the integration and analysis of multispectral satellite images and their metadata

Realizado por
José Francisco Aldana Martín

Tutorizado por
José Manuel García Nieto
María del Mar Roldán García

Departamento
Lenguajes y Ciencias de la Computación
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

MÁLAGA, FEBRERO DE 2020



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INFORMÁTICA
GRADO EN INGENIERÍA DEL SOFTWARE

**Modelo semántico para la integración y análisis de imágenes
multiespectrales de satélite y sus metadatos**

**Semantic model for the integration and analysis of multispectral satellite
images and their metadata**

Realizado por:

José Francisco Aldana Martín

Tutorizado por:

José Manuel García Nieto

María del Mar Roldán García

Departamento:

Lenguajes y Ciencias de la Computación

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

MÁLAGA, FEBRERO DE 2020

Resumen

En el campo del Remote Sensing se está empezando a investigar el uso de ontologías para la integración de la gran cantidad de datos que se producen. No obstante, todavía no se han generado ontologías ni modelos semánticos comúnmente aceptados que den soporte a dicha investigación.

El proyecto Green-Senti del I Plan Propio Smart Campus de la Universidad de Málaga requiere un modelo semántico que permita la consolidación, integración y enlazado de un gran volumen y variedad de datos derivados del análisis Big Data de productos de imágenes multiespectrales de satélite para la Observación de la Tierra, como por ejemplo, Sentinel-2.

Este Trabajo de Fin de Grado aborda, en primera instancia, una parte de esta necesidad a través de la propuesta de un modelo semántico definido mediante una ontología OWL que pueda ser utilizado para la consolidación, integración, razonamiento y enlazado de datos y metadatos de productos de imágenes multiespectrales del satélite Sentinel-2 del programa Copérnico de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Con este objetivo se ha diseñado una ontología OWL y se han generado dos repositorios RDF en Stardog para almacenar las tripletas que representan todos los datos disponibles como parte del proyecto Green-Senti. Además se ha ampliado la API del proyecto Green-Senti para permitir consultas SPARQL a los repositorios RDF generados. Por ñultimo, se presentan casos de usos para validar la utilidad del módulo semántico propuesto.

Palabras clave: Web semántica, Datos Abiertos Enlazados, Lenguaje de Ontologías Web

Abstract

In the field of Remote Sensing, the use of ontologies is being researched to integrate the large amount of data that is produced. However, no ontologies or semantic models have been accepted by the community to support this research.

The Green-Senti project of the “I Plan Propio Smart Campus” of the University of Málaga requires a semantic model that allows the consolidation, integration and linking of a large volume and variety of data derived from the Big Data analysis of multispectral satellite imagery products for the Earth Observation, for example, Sentinel-2.

This Final Year Dissertation addresses, in first instance, part of this need by proposing a semantic model defined by an OWL ontology that can be used for the consolidation, integration, reasoning and linking of data and metadata of multispectral image products of the Sentinel-2 satellite, part of the Copernicus programme of the European Space Agency (ESA).

With this objective an OWL ontology has been designed and two RDF repositories have been generated in Stardog to store the triplets that represent all the available data on the Green-Senti project. In addition, the Green-Senti project API has been extended to allow SPARQL queries to the generated RDF repositories. Several use cases are showcased to validate the utility of the proposed semantic module.

Keywords: Semantic web, Linked Open Data, Web Ontology Language

Índice

Resumen	5
Abstract	7
1. Introducción	11
1.1. Contexto y problema	11
1.2. Motivación	12
1.3. Objetivos	12
1.4. Estructura del documento	13
2. Conceptos y Estado del Arte	15
2.1. Web Semántica	15
2.2. Teledetección	20
2.3. Estado del Arte	23
2.4. Otras tecnologías utilizadas	24
3. Propuesta y Software	27
3.1. Diseño de la ontología	27
3.2. Conversion de datos a RDF	31
3.3. Integración de datos meteorológicos	34
3.4. Integración en el workflow de Green-Senti	36
3.5. Publicación de los datos generados	37
4. Experimentos	41
4.1. Caso de uso 1: Fusión de Sentinel-1 vs. Sentinel-2	41
4.2. Caso de uso 2: Comparación de valores de NDVI entre Sentinel-2 y Landsat 8	44
4.3. Caso de uso 3: Correlaciones entre índices de vegetación y condiciones climatólogicas	46
5. Discusiones	51
6. Conclusiones y Trabajo Futuro	53
Referencias	55

1. Introducción

1.1. Contexto y problema

El desarrollo de nuevos sensores y la creciente facilidad para acceder a los datos generados mediante técnicas de detección remota están transformando el campo del Remote Sensing [Schowengerdt, 2007]. La investigación guiada por datos y el desarrollo de nuevos algoritmos innovadores para su procesamiento y las mejoras en las capacidades computacionales, sigue teniendo una gran importancia para el procesamiento de las grandes cantidades de datos generadas mediante los sistemas de satélites de Observación de la Tierra. Esta gran cantidad de datos es imprescindible para aplicaciones como la supervisión de zonas para controlar el cambio climático, la agricultura de precisión, etc. La comunidad del Remote Sensing considera que una de las líneas de investigación más prometedoras por su impacto práctico se encuentra en el desarrollo de nuevas técnicas guiadas por conocimiento, utilizando técnicas de representación del conocimiento como las ontologías [Arvor et al., 2019]. El gran volumen y variedad de datos en este campo de investigación requiere de su consolidación, integración y enlazado, tanto de datos como de metadatos, que pueden provenir de distintas fuentes como, por ejemplo, productos de imágenes de satélites o drones (UAV).

El proyecto Green-Senti del I Plan Propio Smart Campus UMA, proporciona un servicio web para la monitorización de las zonas verdes del campus de la Universidad de Málaga, a través de la captación y análisis de imágenes de los satélites Sentinel-1/2/3 del programa Copérnico¹. Una de las aportaciones principales de este Trabajo de Fin de Grado al proyecto es una ontología descrita mediante Ontology Web Language (OWL) [W3C OWL Working Group, 2004], que sirva como esquema de integración y consolidación de los datos, y que permitirá publicarlos como Linked Open Data y almacenarlos en repositorios en formato Resource Description Framework (RDF) [Schreiber and Raimond, 2014] para que puedan ser consultados mediante consultas avanzadas en el lenguaje de consulta de grafos SPARQL [Harris and Seaborne, 2013].

¹Programa Copérnico: <https://www.copernicus.eu>

1.2. Motivación

En el campo de Remote Sensing se está impulsando la investigación en el uso de ontologías como soporte a la integración, etiquetado e interpretación de la gran cantidad de datos que se producen. No obstante, aunque hay intentos de ontologías dispersas, no se encuentran lo suficientemente maduras, y no contemplan aspectos importantes como los índices de vegetación, que no son más que prototipos locales para ilustrar el potencial del uso de ontologías. [Arvor et al., 2019]. Existen gran cantidad de constelaciones de satélites de Observación de la Tierra y UAVs (Vehículos aéreos no tripulados) que producen información sobre los mismos escenarios. Esta información debe poder ser integrada y dotada de soporte semántico.

En base a esta necesidad, en este Trabajo de Fin de Grado abordamos el diseño e implementación de un modelo semántico descrito mediante una ontología OWL que pueda ser utilizado para la consolidación, integración, enlazado y razonamiento sobre datos adquiridos por satélites que de soporte a análisis avanzados que no han sido posibles hasta el momento. Nos centraremos en la familia de satélites Sentinel, concretamente en Sentinel-2, aunque considerando otros importantes como Landsat o MODIS, y otros medios de captación como los UAVs.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es diseñar e implementar un modelo semántico guiado por una ontología OWL para la captación, consolidación, integración y enlazado de datos y metadatos de productos de imágenes multiespectrales de satélite para la observación de la tierra. Este modulo semántico proporciona una plataforma integrada para el enlazado y análisis Big Data enriquecido.

Para ello tiene como sub-objetivos:

1. Diseño y desarrollo de una ontología OWL que especifique la estructura de la base de conocimiento y permita ser enlazada con otras ontologías.
2. Transformación al estándar RDF, e integración con los datos de satélite previamente procesados, incluyendo los datos meteorológicos proporcionados por el portal de Open Data de AEMET, mediante el enlazado de una ontología ya desarrollada y publicada por AEMET.

3. Desarrollo de una API de funciones y consultas avanzadas y federadas SPARQL para el acceso a los datos consolidados, que facilite un análisis avanzado, tanto de las imágenes como de los metadatos.
4. Demostración basada en varios casos de uso reales de observación de la tierra.

Para cumplir estos objetivos se presentaran los siguientes resultados:

- Ontología OWL y repositorios RDF en Stardog que almacenarán tanto la TBox como la ABox [Bergman, 2009], y permitirán el razonamiento semántico sobre las tripletas, tanto de los datos de satélite como los meteorológicos que publica la AE-MET mediante su portal Open Data. Endpoint de acceso a los repositorios RDF: <http://khaos.uma.es/opendata/sparql/>.

IRI(Internationalized Resource Identifier) de los grafos RDF para la realización de consultas SPARQL:

earth-observation.owl: <http://khaos.uma.es/green-senti/earth-observation>

aemet.owl: <http://aemet.linkeddata.es/ontology/>

- Repositorio de GitLab que contendrá los casos de uso, scripts y la ontología OWL. <https://gitlab.com/jfaldanam/tfg>
- Portal Open Data en CKAN para la publicación de los datos. <https://opendata.khaos.uma.es/organization/green-senti>
- API pública para realizar consultas SPARQL avanzadas sobre los datos RDF generados. Más información sobre el uso de este Endpoint puede ser encontrado en el CKAN. <http://khaos.uma.es/opendata/sparql/>

1.4. Estructura del documento

Esta memoria esta dividido en 6 Capítulos, recopilando toda la información relacionada con el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado. A continuación, se ofrece una breve descripción de cada uno de ellos.

En el Capítulo 2 se describe una revisión de los conceptos y tecnologías con los que estamos tratando, principalmente Web Semántica y Remote Sensing, profundizando en las tecnologías y herramientas software que han sido utilizadas en el desarrollo de este

proyecto. Además, se presenta del estado del arte en los campos de la Web Semántica y Remote Sensing, mencionando otras ontologías que están siendo usadas en la actualidad.

En el Capítulo 3 se describe en detalle la propuesta realizada en este Trabajo de Fin de Grado y el Software implementado.

En el Capítulo 4 se muestran varios experimentos y casos de uso para demostrar la usabilidad y funcionamiento de la propuesta realizada.

En el Capítulo 5 se ofrece una discusión sobre la propuesta realizada en este Trabajo de Fin de Grado.

En el Capítulo 6 se presenta una conclusión al proyecto a la vez que se mencionaran posibles líneas de trabajo futuro como continuación de este Trabajo de Fin de Grado.

2. Conceptos y Estado del Arte

2.1. Web Semántica

La Web Semántica [Berners-Lee et al., 2001] no es una web separada, sino una extensión de la actual, en la que se le da a la información un significado bien definido, mejorando la cooperación entre ordenadores y personas para trabajar juntos. El desarrollo en este campo está aumentando significativamente nuevas funcionalidades gracias a que los ordenadores serán capaces de procesar y “entender” los datos que en la actualidad solo representan.

El termino “Web Semántica” [World Wide Web Consortium, 2015a] se refiere a la visión del World Wide Web Consortium (W3C) sobre una red de datos enlazados, cuyo objetivo final es permitir a los ordenadores hacer más trabajo útil mediante tecnologías que permitan la creación de almacenes de datos para la red, la construcción de vocabularios y la escritura de reglas para manejar los datos.

Para hacer esta red de datos una realidad, es necesario la existencia de una gran cantidad de datos disponibles con un formato estándar, que además puedan obtenerse y gestionarse por otras herramientas de la Web Semántica. Estos repositorios de datos deben incluir relaciones entre los datos que contienen y con otros datos disponibles en la web. A esta colección de conjuntos de datos interrelacionados es a lo que se conoce como Datos Enlazados (Linked Data) [World Wide Web Consortium, 2015b].

Algunas de las tecnologías mas importantes en el campo de la Web Semántica y de los Linked Data son RDF, OWL y SPARQL, como podemos observar en la Figura 1, que pasamos a definir a continuación.

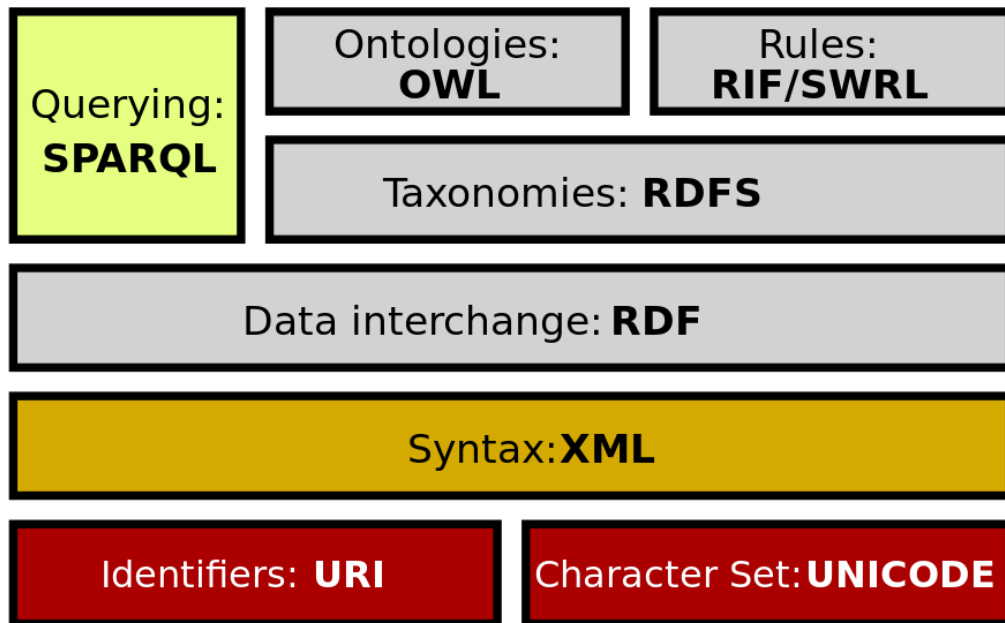


Figura 1: Stack de tecnologías de la Web Semántica. Imagen original de dominio público.

Resource Description Framework (RDF)

RDF [Schreiber and Raimond, 2014] es un estándar del W3C para la representación de información sobre recursos en la Web. Situaciones en las que se recomienda el uso de RDF son las aplicaciones en las que los datos van a ser procesados por otras aplicaciones en vez de ser solo mostrados a personas. RDF ofrece un marco de trabajo común con el que expresar información que puede ser intercambiada entre aplicaciones sin perder el significado, donde cada recurso Web está identificado por una URI (Uniform Resource Identifier).

RDF puede estar serializado en varios formatos, siendo algunos de los más populares Turtle, N-Triples o RDF/XML. Independientemente de la serialización utilizada, las tripletas siguen el formato.

<Sujeto> <Predicado> <Objeto>

En este proyecto, para trabajar con RDF se ha utilizado la librería de código abierto `rdflib`² para Python 3.

²rdflib: <https://github.com/RDFLib/rdflib>

Ontology Web Language (OWL)

Una ontología define un conjunto de primitivas de representación con las que modelar un dominio de conocimiento. Las primitivas de representación suelen ser clases (o conjuntos), atributos (o propiedades) y relaciones. La definición de las primitivas incluye información sobre su significado y restricciones de forma coherente con su aplicación. Las ontologías se sitúan en un nivel “semántico”, como abstracciones de los modelos de datos. Debido a esta independencia, las ontologías son usadas para la integración de bases de datos heterogéneas y la especificación de interfaces para servicios independientes basados en conocimiento [Gruber, 2009].

El Lenguaje de Ontología Web (OWL) [W3C OWL Working Group, 2004] es un lenguaje de marcado semántico para publicar y compartir ontologías en Web. OWL fue desarrollado y publicado en 2004 como una extensión de vocabulario de RDF y derivado del lenguaje de ontologías DAML+OIL.

OWL 2 [W3C OWL Working Group, 2012] es una extensión y revisión del Lenguaje de Ontología Web. Publicado en 2009 por la W3C, diseñado para la representación de conocimiento sobre entidades, conjuntos de entidades y las relaciones entre entidades, en forma de ontologías.

OWL 2 proporciona clases, individuos (instancias de clases), propiedades y valores para dichas propiedades para definir ontologías. Estas ontologías son normalmente intercambiadas como documentos RDF.

Para el desarrollo de la ontología en OWL 2 se ha utilizado la herramienta Protégé.³

SPARQL Protocol And RDF Query Language (SPARQL)

SPARQL [Harris and Seaborne, 2013] es un lenguaje de consultas para grafos RDF, que permite también la ejecución de consultas entre varios grafos que pueden estar en repositorios distintos de la web (consultas federadas).

Las consultas SPARQL pueden estar formadas por las siguientes cláusulas principales:

- **SELECT:** Devuelve todas o un subconjunto de las variables que coincidan con el patrón.

³Protégé: <https://protege.stanford.edu/>

- CONSTRUCT: Devuelve un grafo RDF construido al sustituir las variables en una plantilla de tripletas.
- ASK: Devuelve un valor (TRUE o FALSE) indicando si hay tripletas que coincidan con el patrón.
- DESCRIBE: Devuelve un grafo RDF que describe los recursos encontrados.
- INSERT: Añade tripletas a un grafo.
- DELETE: Elimina tripletas de un grafo.

Estas cláusulas principales vienen acompañadas de una cláusula WHERE formada por un conjunto de tripletas o patrones de tripletas, que se utilizarán en la consulta sobre los grafos que se especifiquen.

Las consultas utilizan el carácter ?X para indicar variables, donde X es el nombre de la variable, y prefijos para indicar a qué grafo pertenece el recurso sin tener que escribir la URI completa, por ejemplo en la tripleta

`?prod greensenti:hasScene greensenti:ejido .`

?prod es una variable en la que se almacenan productos que estén relacionados por un recurso *hasScene*, definido en un grafo identificado como *greensenti*, a un recurso *ejido* del mismo grafo.

Un ejemplo de SPARQL sería la consulta 1, que nos devolvería todos los productos (?prod), que incluyan la localización del campus universitario del Ejido, ordenados por fecha de forma descendiente.

```
PREFIX greensenti: <http://khaos.uma.es/green-senti/earth-observation#>

SELECT ?prod
WHERE {
    ?prod greensenti:hasDate ?date .
    ?prod greensenti:hasScene greensenti:ejido .
} ORDER BY DESC(?date)
```

Fragmento de código 1: Consulta de ejemplo sobre SPARQL

Para la ejecución de consultas SPARQL en repositorios RDF desde Python se ha utilizado la librería SPARQLWrapper.⁴

⁴SPARQLWrapper: <https://github.com/RDFLib/sparqlwrapper>

Ontologías destacadas

En esta sección se realiza una revisión a las ontologías actuales que destacan dentro de los campos de la Web Semántica y Remote Sensing. Estas ontologías han sido integradas con la ontología diseñada en este Trabajo de Fin de Grado, realizando un estudio e integración de acuerdo con los estándares de diseño Ontology 101 [Noy and McGuinness, 2001].

- AEMET

El objetivo de la red de ontologías AEMET [Ontology Engineering Group] es la representación del conocimiento relacionado con las mediciones realizadas por la red de estaciones meteorológicas de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). Estas mediciones representa el estado de la atmósfera en un instante y lugar concreto y se realizan por medio de los sensores integrados en cada estación meteorológica.

El prefijo utilizado en este documento para referirse a esta ontología es *aemet*.

- GeoSPARQL

El estándar GeoSPARQL [Open Geospatial Consortium] de la OGC (Open Geospatial Consortium) soporta la representación y consulta de datos geoespaciales en la Web Semántica. GeoSPARQL define un vocabulario para la representación de datos geoespaciales en RDF y define una extensión del lenguaje de consultas SPARQL para procesar datos geoespaciales.

El prefijo utilizado en este documento para referirse a esta ontología es *geo*.

- OWL-Time

Ontología desarrollada en el contexto del World Wide Web Consortium (W3C) [Consortium, b]. Esta ontología proporciona un vocabulario para expresar propiedades temporal como instantes o intervalos de tiempo. Permite la representación de los instantes temporales en distintos sistemas de referencia como el tiempo Unix o el calendario Gregoriano.

El prefijo utilizado en este documento para referirse a esta ontología es *time*.

2.2. Teledetección

Teledetección (Remote Sensing) [Schowengerdt, 2007] son las técnicas para conseguir información sobre una entidad sin tener contacto directo con ella, utilizando por ejemplo drones o satélites. Debido a la falta de contacto directo con el objeto de interés se utilizan señales propagadas por algún medio, por ejemplo señales ópticas o acústicas. Dentro de los campos de las Ciencias de la Tierra son muy utilizadas las técnicas de teledetección.

Programa Copérnico

El programa Copérnico (anteriormente conocido como GMES o Global Monitoring for Environment and Security) es una iniciativa de la Comisión Europea (EC) en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA) [European Space Agency] para proporcionar información, de forma constante, precisa y de fácil acceso, para mejorar el estudio del medio ambiente y entender y mitigar los efectos del cambio climático y asegurar la seguridad civil.

Para ello, la ESA está desarrollando la familia de satélites Sentinel, de los que actualmente hay 7 en órbita, diseñados para proporcionar imágenes ópticas de gran resolución. Estas imágenes son distribuidas en “productos” que incluyen tanto las imágenes, en las distintas espectrales, como sus metadatos.

El servicio Copernicus Open Access Hub ⁵ permite el filtro y descarga gratuita de los productos de todos los satélites de la familia Sentinel con tan solo registrarnos. En la Figura 2 podemos ver un ejemplo de la herramienta en uso.

Productos de datos multiespectrales de Sentinel-2

Las imágenes de los satélites de la familia Sentinel son distribuidas en productos. Los productos son un archivo comprimido en formato .zip, e incluyen además de las imágenes todos los metadatos que podemos necesitar para trabajar con ellas. Los productos Sentinel son distribuidos en varios niveles de procesado, los niveles 1-C y 2-A son los únicos distribuidos de forma abierta. Las diferencias entre ambos niveles pueden verse en la Tabla 1.

⁵Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>

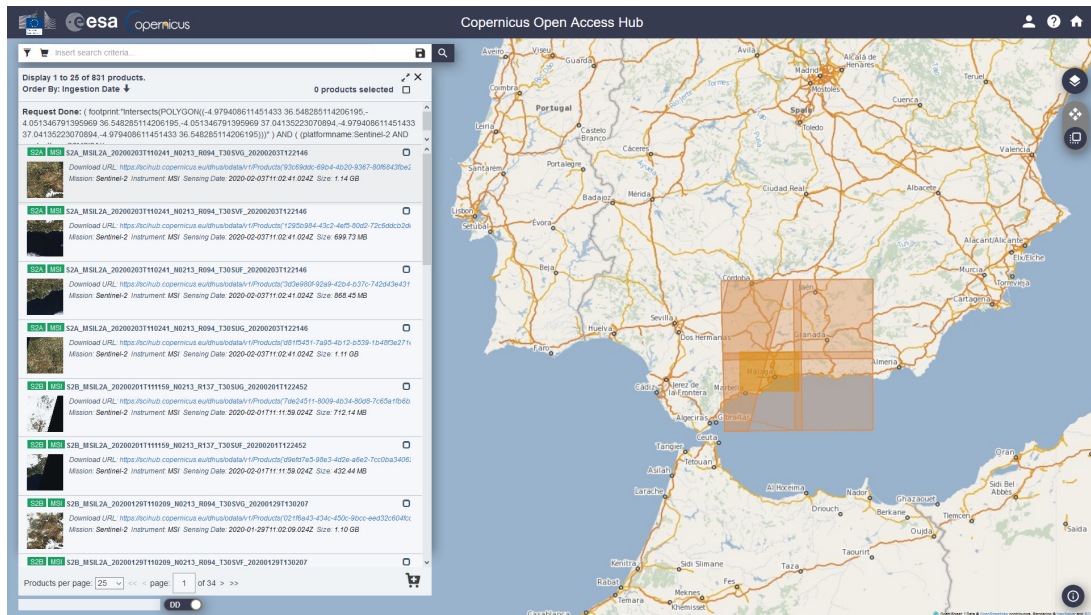


Figura 2: Servicio Copernicus Open Access Hub para la descarga de productos Sentinel <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>.

Name	High-level Description	Data Volume
Level-1C	Top-of-atmosphere reflectances in cartographic geometry	600 MB (each 100x100 km ²)
Level-2A	Bottom-of-atmosphere reflectance in cartographic geometry	800 MB (each 100x100 km ²)

Tabla 1: Tipos de productos para el Sentinel-2 <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types>

El tipo de reflectancia se refiere a en que punto de la atmósfera ha sido tomado un dato. La reflectancia TOA (Top-of-atmosphere) es el valor del dato tomado por el sensor en un satélite, mientras que la reflectancia BOA (Bottom-of-atmosphere) es el valor que tendría si el satélite estuviera bajo la atmósfera, y por lo tanto el valor no estuviera distorsionado por ella.

En este trabajo se hará uso de los productos de nivel 2-A ya que utiliza la reflectancia BOA que nos ofrece un valor más correcto, aunque se puede convertir de uno a otro mediante ciertas formulas más complejas.

Índices de vegetación

Un índice de vegetación [Abdou et al., 1996] es un valor calculado a partir de un conjunto de canales o bandas de sensores de satélite, y cuantifica la intensidad de un fenómeno que es muy complejo para ser descompuesto en parámetros conocidos.

Un ejemplo de este tipo de índice es el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que cuantifica si el objetivo contiene vegetación verde o no. El NDVI se calcula $NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$, donde *RED* es el canal rojo y *NIR* es el canal infrarrojo de espectro electromagnético. Si utilizamos las bandas del Sentinel-2 tendríamos que $NDVI = \frac{B08-B04}{B08+B04}$, donde *B04* es la banda roja y *B08* es la banda infrarroja.

Como podemos apreciar en la Figura 3, las zonas verdes destacan más en su valor NDVI, mientras que, por ejemplo, el campo de fútbol de césped artificial no sale destacado.

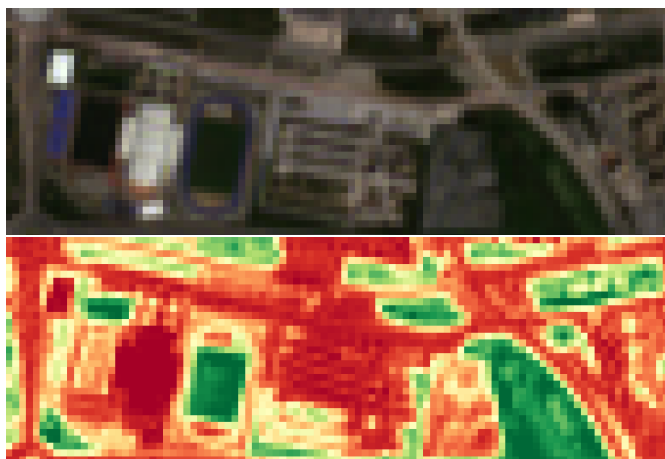


Figura 3: Comparación entre una imagen de Sentinel-2 y el NDVI calculado a partir de ella. Imágenes proporcionadas por el proyecto Green-Senti en <https://khaos.uma.es/green-senti>

Proyecto Green-Senti

El proyecto Green-Senti del I Plan Propio Smart Campus UMA, propone un servicio web para la monitorización de las áreas verdes del campus de la Universidad de Málaga a través de la captura y análisis de imágenes de los satélites Sentinel-2 del Programa Copérnico [Khaos Research]. El objetivo de este proyecto es proporcionar una solución novedosa que sirva de apoyo para mejorar la calidad ambiental del campus.

Este Trabajo de Fin de Grado se enmarca dentro de este proyecto.

Geographic Information System (GIS)

Un sistema de información geográfica (GIS) es un sistema que permite el análisis, manipulación, organización y presentación de datos espaciales o geográficos, por ejemplo los obtenidos mediante técnicas de teledetección.

Para la visualización de productos del programa Copérnico y de los índices de vegetación calculados, se ha utilizado la herramienta QGIS.⁶

2.3. Estado del Arte

El desarrollo de técnicas basadas en conocimiento ha sido identificado como una de las direcciones más importantes para la investigación por la comunidad del Remote Sensing [Chen et al., 2016], teniendo una tendencia significativa la investigación en el sub-campo del análisis de imágenes basado en objetos geográficos (GEOBIA). GEOBIA hace posible la clasificación de objetos en imágenes, es decir grupos de píxeles que comparten una serie de propiedades, en imágenes de satélites a partir de procedimientos de análisis basados en conocimiento de expertos [Blaschke, 2010]. Debido a que detecta complejas relaciones topológicas, incluyendo información relacionada con la forma y la textura del objeto, GEOBIA genera mejores resultados que otras técnicas basadas en el análisis por píxeles [Weih and Riggan, 2010], siendo GEOBIA reconocida por los expertos como un nuevo paradigma para el campo de Remote Sensing [Blaschke et al., 2014].

Considerando los recientes avances en el procesamiento de imágenes con técnicas Big Data, los expertos consideran que un enfoque híbrido entre técnicas basadas en datos y técnicas basadas en conocimiento, combinando procesos inductivos y deductivos, será la mejor manera de aprovechar toda la capacidad de las aplicaciones de Remote Sensing [Arvor et al., 2019]. Mientras que se realizan importantes esfuerzos en compartir mapas de cobertura terrestre, tanto globales como regionales [Grekousis et al., 2015] o en compartir mejores métodos y algoritmos para el procesamiento de imágenes, dentro del campo de Remote Sensing se dedica aún poco esfuerzo a formalizar, agregar y compartir el conocimiento de los expertos. En este contexto, técnicas de representación de conocimiento como las ontologías, representan una posible solución a este problema [Arvor et al., 2013].

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es generar una ontología en formato OWL-2, llamada *earth-observation.owl*, que pueda ser utilizada para mejorar la interpretación

⁶QGIS: <https://www.qgis.org/>

de las imágenes de satélites tal y como es descrito en [Arvor et al., 2019] y que sirva de nexo de unión e integración de aquellas ontologías existentes en el capo de las técnicas de sensores remotos orientados a observación de la Tierra.

2.4. Otras tecnologías utilizadas

Para el desarrollo del Software implementado, en este Trabajo de Fin de Grado se han utilizado las siguientes tecnologías, que ya estaban siendo utilizadas en el proyecto Green-Senti.

Python

Python es un lenguaje de programación de propósito general de alto nivel y código abierto, publicado por Guido van Rossum en 1991 [Python Software Foundation, 2019].

Para el desarrollo se ha usado la versión 3.7, junto con las siguientes librerías:

- rdflib: Permite la creación y manipulación de grafos RDF desde Python de forma sencilla. <https://github.com/RDFLib/rdflib>
- SPARQLWrapper: Librería para la realización de consultas SPARQL. <https://github.com/RDFLib/sparqlwrapper>
- pymongo: Librería oficial para conexiones con MongoDB. <https://github.com/mongodb/mongo-python-driver>
- tqdm: Librería ligera y sencilla para mostrar barras de progreso a partir de iterables en Python. <https://github.com/tqdm/tqdm>
- requests: Librería sencilla para trabajar con peticiones HTTP desde Python. <https://github.com/psf/requests>

MongoDB

MongoDB ⁷ es una base de datos distribuida NoSQL basada en documentos JSON. Algunas de las características que nos ofrece MongoDB son:

- permite la indexación los documentos por cualquier campo.

⁷MongoDB: <https://www.mongodb.com/>

- Replicación para ofrecer alta disponibilidad.
- Equilibrado de carga para escalar de forma horizontal nuestra base de datos.
- Framework de agregación para el procesamiento por lotes de datos.

Un documento valido de MongoDB podría ser:

```
{
  "_id": "5cg0345jk4n6f2g",
  "productId": "134003f0-4bb4-4d71-80be-a60a6e75aec2",
  "metadata": {
    "orbitdirection": "DESCENDING",
    "ingestiondate": "2018-08-07 18:55"
  }
}
```

Fragmento de código 2: Ejemplo de un documento valido de MongoDB.

El proyecto Green-Senti utiliza una base de datos MongoDB para almacenar todos los metadatos de los productos de Sentinel analizados. Siendo esta base de datos la fuente de datos para el script de conversión a tripletas RDF, mediante la librería de Python pymongo⁸. De esta forma, se hacen una serie de funciones mapping que siguen el esquema definido en la ontología.

Almacenamiento de tripletas RDF

Virtuoso⁹ es una de las base de datos RDF más extendidas, especialmente dentro del Open Data, que además ofrece la posibilidad de publicar un endpoint para consultas SPARQL.

Stardog¹⁰ es una base de datos RDF, su última versión abandona el soporte de un endpoint publico, pero nos permite utilizar razonadores directamente sobre las tripletas RDF de los datos almacenados.

Stardog es la base de datos que ha sido usada para almacenar todas las tripletas RDF generadas a partir de los productos de Sentinel-2 durante el desarrollo, pero tras la finalización del proyecto se migraron los datos a Virtuoso para su publicación.

⁸pymongo: <https://github.com/mongodb/mongo-python-driver>

⁹Virtuoso: <https://virtuoso.openlinksw.com/>

¹⁰Stardog: <https://www.stardog.com/>

CKAN

CKAN (Comprehensive Knowledge Archive Network) ¹¹ es un portal open-source para el almacenamiento y distribución de Open Data y es mantenido por la Open Knowledge Foundation.

Los resultados de este Trabajo de Fin de Grado serán publicados en el CKAN del grupo de investigación Khaos dentro de la organización del proyecto Green-Senti ¹².

En concreto se realizarán 5 repositorios:

- **Earth Observation ontology:** Incluye la ontología así como su ABox, en formato RDF/XML y nt, y consultas SPARQL de ejemplo.
- **AEMET ontology ABox:** Incluye la ABox generada a partir del portal Open-Data de AEMET, en formato RDF/XML y nt, y consultas SPARQL de ejemplo.
- **Green Area Teatinos:** Contiene los resultados del caso de uso 1 en formato CSV.
- **Comparison of several vegetative indices between Sentinel-2 and Landsat 8 products:** Contiene los resultados del caso de uso 2 en formato CSV.
- **Correlations between vegetation indices and weather conditions :** Contiene los resultados del caso de uso 3 en formato CSV.

¹¹CKAN: <https://ckan.org/>

¹²CKAN del proyecto Green-Senti: <https://opendata.khaos.uma.es/organization/green-senti>

3. Propuesta y Software

La propuesta de este Trabajo de Fin de Grado es la implementación de un modelo semántico guiado por ontología y su integración dentro del flujo de trabajo del proyecto Green-Senti.

Para su desarrollo, se ha seguido una metodología iterativa incremental [Paasivaara and Lassenius, 2004]. En este capítulo, se describe el desarrollo de cada iteración así como las decisiones de diseño tomadas en cada una de ellas.

3.1. Diseño de la ontología

En esta primera iteración, el objetivo es implementar la ontología OWL-2 que sirva de modelo semántico a todos los datos disponibles en el proyecto Green-Senti. Uno de los requisitos más importantes a cumplir por la ontología es que sea de fácil extensión en el futuro, por ejemplo, a nuevas fuentes de datos o tipos de productos.

Para ello se han modelado las siguientes clases:

- Snapshot: Abstracción sobre el conjunto de datos calculados sobre un *Producto* para una *Escena* concreta.
- Scene (Escena): Lugar de interés que se encuentra dentro de la imagen de un *Producto*.

La escena esta definida por una zona geográfica definida por *geo:Geometry* de la ontología GeoSPARQL.

- Data Source (Fuente de datos): Abstracción sobre la entidad que genera los datos de un *Producto* para facilitar la extensión de la ontología en el futuro. De ella extiende cualquier posible fuente de datos que se quiera incluir, como por ejemplo *Sentinel 2*.
- Product (Producto): Abstracción del conjunto de datos obtenidos de una *Fuente de Datos*. A partir de ella se definen clases concretas que contienen las propiedades de dicho tipo de productos, por ejemplo *Sentinel 2 Product*, que modela todos los metadatos de los productos Sentinel-2 del programa Copérnico.

Los productos son capturados en un momento específico de tiempo definido por la clase *time:GeneralDateTimeDescription* de la ontología OWL-Time.

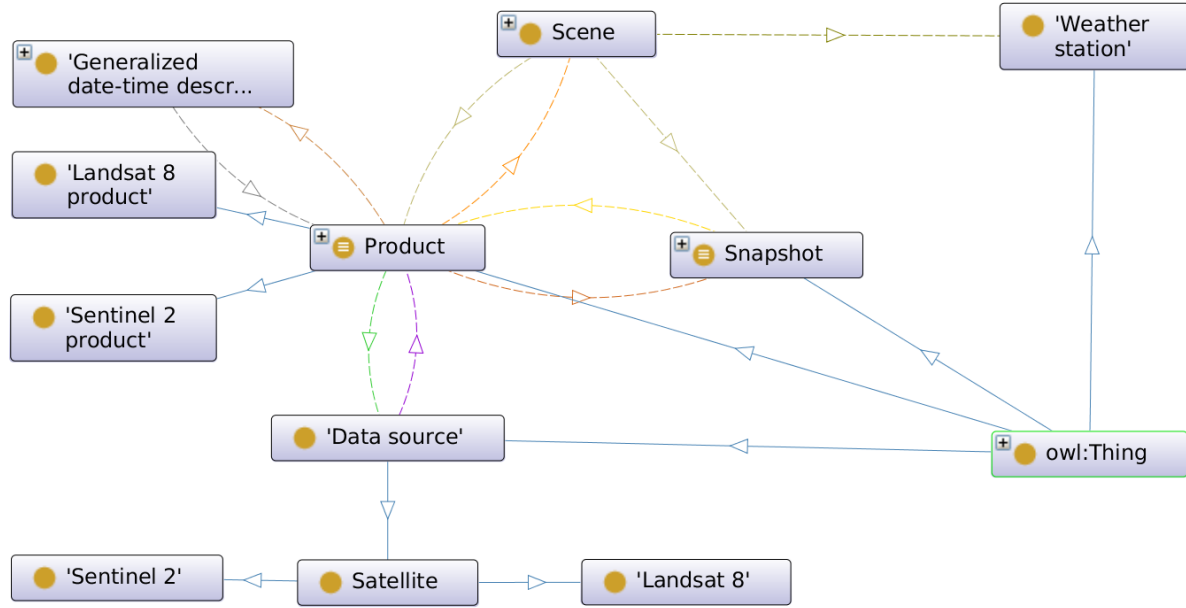


Figura 4: Diagrama de clases de la ontología propuesta. Grafo generado con el plugin ontograf para Protégé.

La Figura 4 muestra un diagrama de clases de la ontología diseñada. En este diagrama la relación de subclase esta indicada con flechas con linea continua, como por ejemplo entre la clase *Sentinel-2* y *Satelite*. Las propiedades de objeto son indicadas con flechas discontinuas como, por ejemplo, entre las clases *Product* y *Scene*

Las relaciones entre las clases han sido modeladas a través de las siguientes propiedades de objeto, definidas en lógica de descripciones en la tabla 2.

Los atributos de cada clase han sido definidos mediante propiedades de datos. Debido a la gran cantidad de atributos que incluyen los productos Sentinel-2 se mostrarán solo un subconjunto en la tabla 3, el conjunto completo de propiedades están representado en el fichero de la ontología, earth-observation.owl¹³.

¹³Serialización RDF/XML de la ontología: <https://opendata.khaos.uma.es/dataset/earth-observation-ontology>

Propiedades de objeto	Lógica de descripciones
hasDataSource	$\text{hasDataSource} \equiv \text{isDataSourceOf}^-$ $\exists \text{ hasDataSource Thing} \sqsubseteq \text{Product}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ hasDataSource DataSource}$
hasDate	$\text{hasDate} \equiv \text{isDateOf}^-$ $\top \sqsubseteq \leq 1 \text{ hasDate Thing}$ $\exists \text{ hasDate Thing} \sqsubseteq \text{Product}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ hasDate GeneralDateTimeDescription}$
hasNearestStation	$\exists \text{ hasNearestStation Thing} \sqsubseteq \text{Scene}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ hasNearestStation WeatherStation}$
hasProduct	$\text{hasProduct} \equiv \text{isProductOf}^-$ $\exists \text{ hasProduct Thing} \sqsubseteq \text{Snapshot}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ hasProduct Product}$
hasScene	$\text{hasScene} \equiv \text{isSceneOf}^-$ $\exists \text{ hasScene Thing} \sqsubseteq \text{SpatialObject}$ $\exists \text{ hasScene Thing} \sqsubseteq \text{Product}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ hasScene Scene}$
isDataSourceOf	$\text{hasDataSource} \equiv \text{isDataSourceOf}^-$ $\exists \text{ isDataSourceOf Thing} \sqsubseteq \text{DataSource}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ isDataSourceOf Product}$
isDateOf	$\text{hasDate} \equiv \text{isDateOf}^-$ $\top \sqsubseteq \leq 1 \text{ isDateOf}^- \text{ Thing}$ $\exists \text{ isDateOf Thing} \sqsubseteq \text{GeneralDateTimeDescription}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ isDateOf Product}$
isProductOf	$\text{hasProduct} \equiv \text{isProductOf}^-$ $\exists \text{ isProductOf Thing} \sqsubseteq \text{Product}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ isProductOf Snapshot}$
isSceneOf	$\text{hasScene} \equiv \text{isSceneOf}^-$ $\exists \text{ isSceneOf Thing} \sqsubseteq \text{Scene}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ isSceneOf Snapshot}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ isSceneOf Product}$

Tabla 2: Definición de las propiedades de objetos definidas en lógica de descripciones.

Propiedades de datos	Lógica de descripciones
sentinel2ProductProperties	\exists sentinel2ProductProperties Datatype: $\text{rdfs:Literal} \sqsubseteq \text{Sentinel2Product}$
footprint	$\sqsubseteq \text{sentinel2ProductProperties}$ $\sqsubseteq \text{landsat8ProductProperties}$ $\top \sqsubseteq \leq 1 \text{ footprint}$ $\exists \text{ footprint Datatype: rdfs:Literal} \sqsubseteq \text{Sentinel2Product}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ footprint Datatype rdfs:string}$
title	$\sqsubseteq \text{sentinel2ProductProperties}$ $\top \sqsubseteq \leq 1 \text{ title}$ $\exists \text{ title Datatype: rdfs:Literal} \sqsubseteq \text{Sentinel2Product}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ title Datatype: xmlns:string}$
link	$\sqsubseteq \text{sentinel2ProductProperties}$ $\top \sqsubseteq \leq 1 \text{ link}$ $\exists \text{ link Datatype: rdfs:Literal} \sqsubseteq \text{Sentinel2Product}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ link Datatype xmlns:anyURI}$
SnapshotProperties	$\exists \text{ SnapshotProperties Datatype:}$ $\text{rdfs:Literal} \sqsubseteq \text{Snapshot}$
ndvi	$\sqsubseteq \text{SnapshotProperties}$ $\top \sqsubseteq \leq 1 \text{ ndvi}$ $\exists \text{ ndvi Datatype : rdfs:Literal} \sqsubseteq \text{Snapshot}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ ndvi Datatype: xmlns:decimal}$
ndvi_image	$\sqsubseteq \text{SnapshotProperties}$ $\exists \text{ ndvi_image Datatype: rdfs:Literal} \sqsubseteq \text{Snapshot}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ ndvi_image Datatype: xmlns:anyURI}$
true_color	$\sqsubseteq \text{SnapshotProperties}$ $\top \sqsubseteq \leq 1 \text{ true_color}$ $\exists \text{ true_color Datatype: rdfs:Literal} \sqsubseteq \text{Snapshot}$ $\top \sqsubseteq \forall \text{ true_color Datatype: xmlns:decimal}$

Tabla 3: Definición de las propiedades de datos definidas en lógica de descripciones.

3.2. Conversion de datos a RDF

En esta iteración se desarrolla en Python un script para la conversión de los datos disponibles en la API publica del proyecto Green-Senti a RDF. Los datos están disponibles en formato JSON, por lo que se realiza la consulta y conversión siguiendo el esquema definido en la ontología.

Los datos a transformar están divididos en dos conjuntos principales, los metadatos del producto de Sentinel-2 definidos dentro de una subclase de *Product* y los índices de vegetación, además de otros datos que han sido calculados a partir del producto definidos dentro de la *Snapshot*.

Este script utiliza la base de datos MongoDB interna del proyecto Green-Senti como fuente de datos, leyendo documentos JSON, y genera como salida un documento RDF con los datos estructurados siguiendo el modelo semántico generado en la primera iteración.

Estos documentos se almacenan junto con la ontología en un repositorio Stardog para facilitar su acceso mediante consultas SPARQL y permitir el uso de un razonador sobre las tripletas RDF generadas.

El script permite la uso de serializaciones RDF/XML(.rdf), más legible para personas, o Turtle(.nt), única serialización aceptada por algunas versiones de Stardog. El diagrama de flujo de control de datos puede verse en la Figura 5.

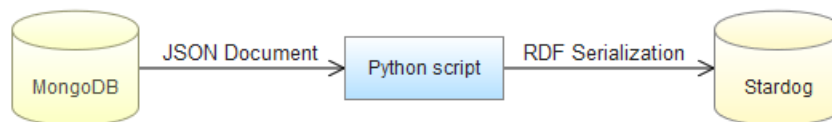


Figura 5: Diagrama de flujo de datos del script propuesto. Diagrama generado con <https://app.genmymodel.com>

```

{
  "_id":{
    "$oid":"5df8b3409aa036462326e896"
  }, "META":{
    "title":"S2A_MSIL2A_20190916T105701_N0213_R094_T30SUF_20190916T135744",
    "link":"https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/
      Products('30f34682-b377-4cd7-a1c3-28643a2bc1b0')/$value",
    "summary":"Date: 2019-09-16T10:57:01.024Z, Instrument: MSI, Mode: ,
      Satellite: Sentinel-2, Size: 977.69 MB",
    "beginposition": {
      "$date":{"$numberLong":"1568631421024"
    }},
    "endposition":{"$date":{"$numberLong":"1568631421024"}},
  }, "INDEX":{
    "moisture":{
      "value":{"$numberDouble":"-0.036285508424043655"},
      "dir":"hdfs://192.168.213.29:9000/smartcampus/
        S2A_MSIL2A_20190916T105701_N0213_R094_T30SUF_20190916T135744/
        teatinos/moisture"
    }, "ndvi":{
      "value":{"$numberDouble":"0.15926115214824677"},
      "dir":"hdfs://192.168.213.29:9000/smartcampus/
        S2A_MSIL2A_20190916T105701_N0213_R094_T30SUF_20190916T135744/
        teatinos/ndvi"
    }, "ndsi":{
      "value":{"$numberDouble":"0.6265652951699463"},
      "dir":"hdfs://192.168.213.29:9000/smartcampus/
        S2A_MSIL2A_20190916T105701_N0213_R094_T30SUF_20190916T135744/
        teatinos/ndsi"
    },
  }
}

```

Fragmento de código 3: Ejemplo de un documento JSON almacenado en MongoDB. Se han mostrado solo algunos campos de META y INDEX por concisión.

```

<rdf:Description rdf:about="http://khaos.uma.es/green-senti/
  earth-observation#023e7820-7076-4063-b335-c00c4a013d6e">
  <greensenti:hasScene rdf:resource="http://khaos.uma.es/green-senti/
    earth-observation#teatinos"/>
  <greensenti:hasDate rdf:resource="http://www.w3.org/2006/time#20190916"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://khaos.uma.es/green-senti/
    earth-observation#Sentinel2Product"/>
  <greensenti:title>
    S2A_MSIL2A_20190916T105701_N0213_R094_T30SUF_20190916T135744
  </greensenti:title>
  <greensenti:link>
    https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/
      Products('30f34682-b377-4cd7-a1c3-28643a2bc1b0')/$value
  </greensenti:link>
  <greensenti:summary>
    Date: 2019-09-16T10:57:01.024Z, Instrument: MSI, Mode: ,
    Satellite: Sentinel-2, Size: 977.69 MB
  </greensenti:summary>
  <greensenti:beginposition>2019-09-16T10:57</greensenti:beginposition>
  <greensenti:endposition>2019-09-16T11:36</greensenti:endposition>
</rdf:Description>
<rdf:Description rdf:about="http://khaos.uma.es/green-senti/
  earth-observation#023e7820-7076-4063-b335-c00c4a013d6e_in_teatinos">
  <greensenti:hasScene rdf:resource="http://khaos.uma.es/green-senti/
    earth-observation#teatinos"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://khaos.uma.es/green-senti/
    earth-observation#Snapshot"/>
  <greensenti:hasProduct rdf:resource="http://khaos.uma.es/green-senti
    /earth-observation#ddd32d34-b742-4e6a-a77e-a3a566b8ec8c"/>
  <greensenti:MOISTURE>-0.036285508424043655</greensenti:MOISTURE>
  <greensenti:MOISTURE_Image rdf:resource="hdfs://192.168.213.29:9000/smartcampus/
    S2A_MSIL2A_20190916T105701_N0213_R094_T30SUF_20190916T135744/
    teatinos/moisture"/>
  <greensenti:NDVI>0.15926115214824677</greensenti:NDVI>
  <greensenti:NDVI_Image rdf:resource="hdfs://192.168.213.29:9000/smartcampus/
    S2A_MSIL2A_20190916T105701_N0213_R094_T30SUF_20190916T135744/
    teatinos/ndvi"/>
  <greensenti:NDSI>0.6265652951699463</greensenti:NDSI>
  <greensenti:NDSI_Image rdf:resource="hdfs://192.168.213.29:9000/smartcampus/
    S2A_MSIL2A_20190916T105701_N0213_R094_T30SUF_20190916T135744/
    teatinos/ndsi"/>
</rdf:Description>

```

Fragmento de código 4: Ejemplo de la representación RDF generado a partir del JSON del Fragmento de Código 3

Un ejemplo de ejecución del script utilizando el Fragmento de código 3 como entrada nos devolvería como resultado el RDF mostrado en el Fragmento de código 4. En este ejemplo podemos ver dos elementos de nivel superior que están definidos como `<rdf:Description... >` que son el sujeto de las tripletas (el primero), siendo los elementos interiores el objeto y predicado de cada triplete. Por ejemplo la triplete *El producto 023e7... tiene como escena Teatinos* se escribiría como en el Fragmento de código 5.

```
<rdf:Description rdf:about="http://khaos.uma.es/green-senti/
earth-observation#023e7820-7076-4063-b335-c00c4a013d6e">
  <greensenti:hasScene rdf:resource="http://khaos.uma.es/green-senti/
earth-observation#teatinos"/>
</rdf:Description>
```

Fragmento de código 5: Ejemplo de la representación RDF generado a partir del JSON del Fragmento de Código 3

3.3. Integración de datos meteorológicos

En esta iteración se extiende la ontología para incluir los datos meteorológicos proporcionados por el portal Open Data de la AEMET. Esta ampliación es debida al gran interés que tienen los datos meteorológicos para relacionarlos con índices de vegetación como el NDVI. Esto se debe a la clara relación entre el estado de la vegetación y el clima en una escena de interés.

La integración de la ontología de AEMET con la propuesta se ha realizado a través de la clase *Escena*, que puede tener asociada una estación meteorológica cercana, sobre la que se podrían solicitar los datos meteorológicos más relevantes. En la Figura 6 esta relación se realiza mediante la O. localización.

Además, tanto la clase *Product* como la clase *aemet:Observation*, utilizan la clase *time:GeneralDateTimeDescription* para definir el instante o intervalo en el que fueron capturados, lo que nos permite tomar mediciones meteorológicas lo más cercanas posibles a la captura del producto a analizar. En la figura 6 esta relación se realiza mediante la O. Tiempo.

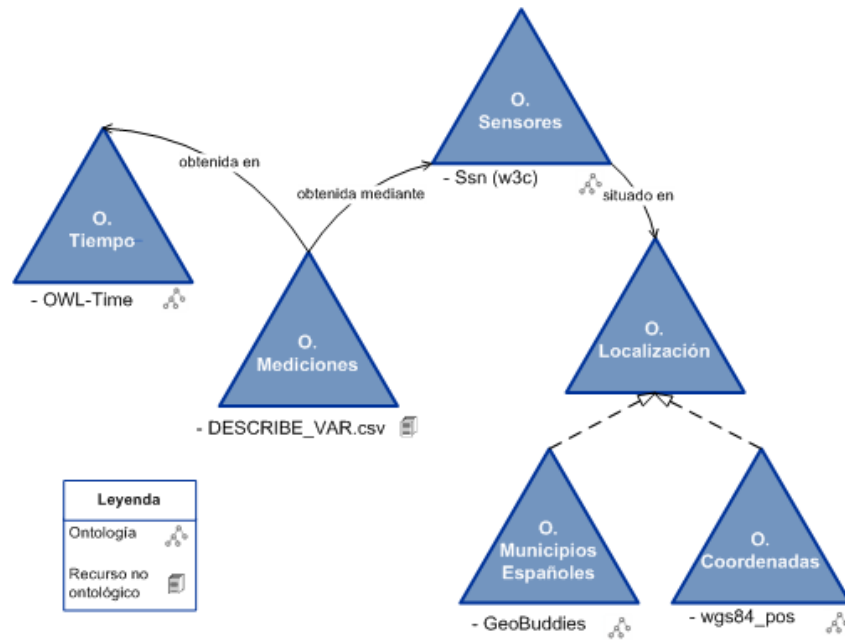


Figura 6: Grafo conceptual de la red de ontologías AEMET. Fuente de la imagen <http://aemet.linkeddata.es/models.html>

Por otro lado también se ha desarrollado una nueva versión del script que generara también RDF basado en la ontología de AEMET, con los datos abiertos de las fechas en las que los satélites Sentinel-2 han capturado productos sobre la escena de interés.

El RDF generado con los datos de AEMET se exporta a otro grafo RDF, ya que se describen con una ontología diferente. Para recopilar datos de ambos grafos se utilizarán consultas SPARQL federadas como se demostrará en los casos de uso.

La Figura 7 muestra un diagrama de flujo de datos del script propuesto, tras la inclusión de los datos de AEMET.

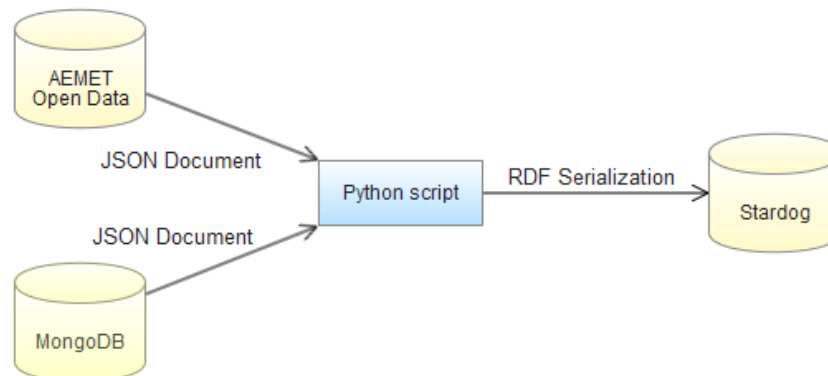


Figura 7: Diagrama de flujo de datos del script propuesto, tras la inclusión de los datos de AEMET. Diagrama generado con <https://app.genmymodel.com>

3.4. Integración en el workflow de Green-Senti

En esta iteración, se integran los scripts de conversión a RDF en el workflow del proyecto Green-Senti. El workflow del proyecto es el servicio que ejecuta todo el proceso de descarga y análisis sobre los productos de Sentinel-2.

De forma breve las tareas ejecutadas por el workflow son:

- Consulta al servicio REST del proyecto Copernico para obtener una lista de productos disponibles.
- Para cada elemento de la lista obtenida que aún no ha sido analizado:
 - Descarga del producto.
 - Descomprime el producto.
 - Analiza el producto.
 - Almacena los resultados en MongoDB y HDFS (Hadoop Distributed File System)

Para la integración en el workflow descartamos MongoDB como fuente de datos y trabajamos directamente con los objetos Product que utiliza el workflow. Para ello, el script es lanzado una vez que acaba la fase de análisis del producto y de almacenamiento de los resultados, generando RDF para un solo producto y almacenándolo en Stardog.

Para evitar el envío de multitud pequeñas de peticiones al servicio Open Data de AEMET, se almacenan las fechas sobre las que son necesarios los datos meteorológicos y se realiza una única petición una vez que se han analizado todos los productos. Tras esto se genera y almacena todo el RDF generado a partir de la ontología AEMET. Este proceso se muestra en la Figura 8.

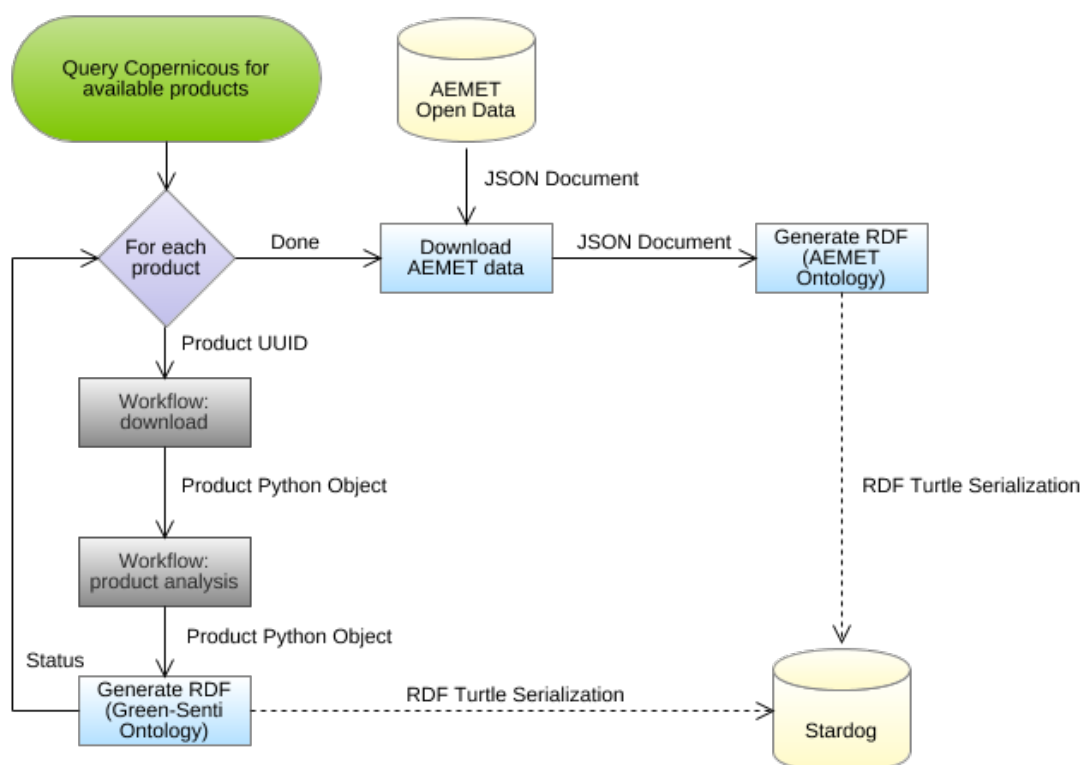


Figura 8: Diagrama de flujo de datos del script propuesto, integrado en el workflow de Green-Senti. Diagrama generado con <https://app.genmymodel.com>

3.5. Publicación de los datos generados

Todos los datos generados por el proyecto Green-Senti son accesibles de forma pública a través de una API REST y un portal Open Data utilizando CKAN. Por lo tanto, tras completar el proyecto, se ha implementado un nuevo Endpoint para la API REST del proyecto para el acceso a los datos meteorológicos. Además se han preparado varios dataset en CKAN con ejemplos de consultas SPARQL y enlaces a los Endpoints públicos sobre los que pueden ser ejecutadas.

Ampliación de la API REST

Tras la integración de los datos de AEMET en la ontología desarrollada, había que ampliar la API REST del proyecto para que incluyera los datos meteorológicos en formato JSON.

Para esto, se amplió la aplicación Flask que lleva el servicio REST con un nuevo

Endpoint para acceder a los datos meteorológicos de una escena en una fecha concreta. Esta ampliación utiliza la base de datos de Stardog, donde se almacenan los resultados del workflow del proyecto a través de la consulta federada SPARQL que podemos ver en el Fragmento de Código 6.

```
PREFIX greensenti: <http://khaos.uma.es/green-senti/earth-observation#>
PREFIX time: <http://www.w3.org/2006/time#>
PREFIX aemet: <http://aemet.linkeddata.es/ontology/>

SELECT distinct ?prop ?val WHERE {
    greensenti:SCENE greensenti:hasNearestStation ?station .
    ?obs aemet:isCapturedBy ?station .
    ?obs aemet:valueOfObservedData ?val .
    ?obs aemet:observedProperty ?prop .
    ?obs aemet:observedInInterval time:DATE .
} Limit 100
```

Fragmento de código 6: Consulta que devuelve todas las mediciones meteorologicas para una fecha y scena concreta

Siendo SCENE y DATE la escena y la fecha respectivamente que son recibidos como parámetros. En la Tabla 4 podemos observar un posible resultado de la ampliación de la API.

Observación	Valor
http://aemet.linkeddata.es/ontology/PressureMinimum	"1007.8"
http://aemet.linkeddata.es/ontology/WindDirection	"14"
http://aemet.linkeddata.es/ontology/Precipitation	"0.0"
http://aemet.linkeddata.es/ontology/WindSpeedAverage	"2.8"
http://aemet.linkeddata.es/ontology/TemperatureMaximum	"31.3"
http://aemet.linkeddata.es/ontology/Height	"54"
http://aemet.linkeddata.es/ontology/TemperatureMinimum	"21.0"
http://aemet.linkeddata.es/ontology/PressureMaximum	"1010.5"
http://aemet.linkeddata.es/ontology/WindGust	"10.6"
http://aemet.linkeddata.es/ontology/TemperatureAverage	"26.2"

Tabla 4: Resultado de llamar a la consulta en el Fragmento de Código 6 con los parametros *SCENE = teatinos* y *DATE = 20170831*

Publicación de datos en CKAN

Se han publicado la ontología y una muestra de los datos RDF generados en el CKAN del proyecto Green-Senti, acompañados de un enlace al Endpoint SPARQL del proyecto incluyendo algunas consultas SPARQL de ejemplo.

El CKAN puede ser visitado en <https://opendata.khaos.uma.es/organization/green-senti>.

Los experimentos realizados a continuación, representan casos de uso para la validación del módulo semántico.

4. Experimentos

Para validar la utilidad de la ontología propuesta se han desarrollado 3 casos de uso sobre los datos trabajados en el proyecto y sobre imágenes del satélite Landsat 8, lanzado por la NASA en colaboración con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Estos 3 casos representan funcionalidades diferentes, encaminadas a la fusión de Sentinel-1 y Sentinel-2, la comparación de varios satélites y correlaciones entre índices de vegetación y datos meteorológicos.

4.1. Caso de uso 1: Fusión de Sentinel-1 vs. Sentinel-2

Dentro del proyecto Green-Senti se realizó un dataset y una serie temporal de los porcentajes de zona verde de Teatinos durante los últimos 5 años, utilizando los productos de los satélites Sentinel-1 y Sentinel-2. Esta tarea se realizó mediante varios scripts Python y bash que descarga los productos de Sentinel y los datos de AEMET y posteriormente generaba un dataset en formato CSV.

En este caso de uso, se muestra cómo se simplifica el proceso de creación de este dataset mediante el uso de la ontología y repositorio RDF propuestos en este Trabajo de Fin de Grado, ya que permite la consulta sobre varios satélites Sentinel sobre una misma escena.

Proceso original

- Ejecución de un script bash, proporcionado por la ESA ¹⁴, para filtrar y descargar todos los productos Sentinel que cubran una zona geojson definida.
- Ejecución de un script Python para descargar los datos de AEMET, para cada fecha en la que haya un producto descargado.
- Ejecución de un script Python para analizar los productos Sentinel y generar el archivo CSV.

Los dos primeros scripts de este proceso pueden ser sustituidos por consultas SPARQL a la ontología propuesta, de forma que todo acabe integrado en un solo script Python.

¹⁴Script bash para la descarga de productos Sentinel: https://scihub.copernicus.eu/twiki/do/view/SciHubUserGuide/BatchScripting#Scripts_Examples

Proceso propuesto

- Conseguir la lista de productos y los link de descargas mediante la consulta mostrada en el Fragmento de Código 7 para su descarga con cualquier herramienta, por ejemplo la librería wget de Python.
- Conseguir los datos de AEMET para las fechas escogidas mediante la consulta mostrada en el Fragmento de Código 8.
- Ejecución de un script Python para el análisis los productos Sentinel y generar el archivo CSV.

```
PREFIX greensenti: <http://khaos.uma.es/green-senti/earth-observation#>
SELECT ?uuid ?date ?link
WHERE {
    ?product greensenti:hasScene ?scene . FILTER(?scene = greensenti:teatinos) .
    ?product greensenti:hasDate ?date .
    ?product rdf:type greensenti:Sentinel2Product .
    ?product greensenti:link ?link .
    ?product greensenti:uuid ?uuid .
}
```

Fragmento de código 7: Consulta que recoge todos los enlaces de descarga de los productos en una escena concreta, en este caso Teatinos.

```
PREFIX greensenti: <http://khaos.uma.es/green-senti/earth-observation#>
PREFIX aemet: <http://aemet.linkeddata.es/ontology/>

SELECT distinct ?date ?prop ?val WHERE {
    ?scene greensenti:hasNearestStation ?station . FILTER(?scene = greensenti:teatinos) .
    ?obs aemet:isCapturedBy ?station .
    ?obs aemet:valueOfObservedData ?val .
    ?obs aemet:observedProperty ?prop .
    ?obs aemet:observedInInterval ?date .
}
```

Fragmento de código 8: Consulta que devuelve todos los datos meteorológicos para una escena concreta, en este caso Teatinos.

Resultados

En la Figura 9 podemos ver como a partir de 2018, fecha en que Sentinel-2 empieza a publicar datos, los valores recogidos por Sentinel-1 son, en general, más bajos que los valores tomados por Sentinel-2.

DATE	GREEN AREA(HA)	GREEN ZONE(%)	CLOUD(%)	MOISTURE
20181110	134700	8.0	5.7051	0.463
20180921	88400	5.25	3.54	0.339
20180519	54000	3.21	3.720	0.378
20190514	110100	6.54	1.378	0.355
20181205	564000	33.52	2.287	0.446
20181001	15000	0.89	7.279	0.394
20180414	463100	27.52	2.085	0.432
20190305	36200	2.15	5.598	0.445
20190519	112300	6.67	1.889	0.361
20180708	112600	6.69	3.732	0.350
20181225	139100	8.27	7.547	0.447
20181006	95600	5.68	1.360	0.333
20180628	85000	5.05	3.084	0.359
20180926	23700	1.41	13.323	0.313
20180728	112400	6.68	3.518	0.354
20190203	565200	33.59	1.016	0.444
20190218	8800	0.52	6.780	0.415

Tabla 5: Extracto del dataset “greensenti_sentinel2a.csv”. El dataset completo puede ser encontrado en el CKAN del proyecto Green-Senti.

En la Tabla 5 podemos ver un subconjunto de los datos de este experimento, en ella podemos observar como el área verde es mayor entre los meses de diciembre a mayo. Los dataset completos generados en este experimento pueden ser encontrados en el portal Open Data del proyecto Green-Senti ¹⁵.

¹⁵Datasets del experimento sobre la zona verde en Teatinos: <https://opendata.khaos.uma.es/dataset/green-area-of-teatinos>

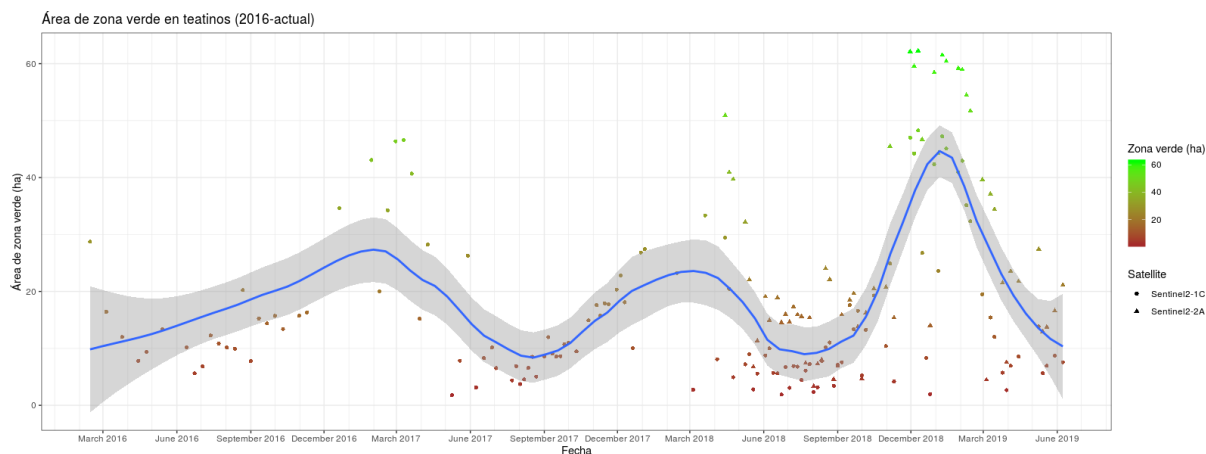


Figura 9: Gráfica que refleja el número de hectáreas de zona verde durante los últimos 5 años en el campus de Teatinos.

4.2. Caso de uso 2: Comparación de valores de NDVI entre Sentinel-2 y Landsat 8

Otro de los experimentos realizados dentro del proyecto Green-Senti ha sido la realización de un dataset que incluya los datos de bandas, así como algunos de los índices, tanto de satélites Sentinel como de Landsat. Para este dataset se decidió utilizar solamente fechas de las que hubiera productos en ambas plataformas, ya que los productos de Sentinel 2 tienen un periodo de entre 2 y 5 días dependiendo de la latitud, mientras que los productos de Landsat 8 tienen un periodo de unos 16 días.

Esto conlleva el gran inconveniente de que los productos de ambos satélites son distribuidos en portales diferentes (Copernicus Open Access Hub vs USGS Earth Explorer), por lo tanto para conseguir la intersección de las fechas sobre las que había productos tendríamos que descargar ambas listas completas de productos y ejecutar sobre ellas una búsqueda sobre qué fechas hay datos en ambas plataformas.

Al igual que en el primer caso de uso, este gran trabajo manual puede ser sustituido por una consulta SPARQL que devuelva los productos, junto con su NDVI, que cumplan la restricción temporal impuesta.

```
PREFIX greensenti: <http://khaos.uma.es/green-senti/earth-observation#>
```

```
SELECT ?date ?productS2 ?ndviS2 ?productL8 ?ndviL8
WHERE {
    ?productS2 greensenti:hasDate ?date .
    ?productS2 rdf:type greensenti:Sentinel2Product .
    ?snapshotS2 greensenti:hasProduct ?productS2 .
    ?snapshotS2 greensenti:hasScene greensenti:teatinos .
    ?snapshotS2 rdf:type greensenti:Snapshot .
    ?snapshotS2 greensenti:NDVI ?ndviS2 .

    ?productL8 greensenti:hasDate ?date .
    ?productL8 rdf:type greensenti:Landsat8Product .
    ?snapshotL8 greensenti:hasProduct ?productL8 .
    ?snapshotL8 greensenti:hasScene greensenti:teatinos .
    ?snapshotL8 rdf:type greensenti:Snapshot .
    ?snapshotL8 greensenti:NDVI ?ndviL8 .
}
```

Fragmento de código 9: Consulta que devuelve las fechas sobre las que coinciden mediciones de Sentinel y Landsat, así como los valores de NDVI de cada satélite.

Resultados

En la Tabla 6, podemos ver todas las fechas sobre las que se realizó el experimento. Estas fechas son todas aquellas en las que hay producto para ambos satélites con una diferencia máxima de 1 día.

Como podemos observar de los 140 productos de Landsat 8 y 96 productos de Sentinel-2 de los que disponíamos, solo disponemos de 16 parejas que se encuentren a 1 día de diferencia o menos. Para todas las parejas de productos se ha generado un dataset con comparación de los valores de las distintas bandas y índices píxel a píxel.

Los dataset generados en este experimento pueden ser encontrados en el portal Open Data del proyecto Green-Senti ¹⁶.

¹⁶Datasets del experimento sobre la comparación de los valores NDVI entre Sentinel y Landsat: <https://opendata.khaos.uma.es/dataset/sentinel-landsat-comparison>

Landsat product date	Sentinel product date	Timedelta (in days)
2018-05-28	2018-05-29	1
2018-06-13	2018-06-13	0
2018-06-29	2018-06-28	1
2018-09-01	2018-09-01	0
2018-09-17	2018-09-16	1
2018-11-04	2018-11-05	1
2018-11-20	2018-11-20	0
2018-12-06	2018-12-05	1
2019-01-23	2019-01-24	1
2019-02-08	2019-02-08	0
2019-02-24	2019-02-23	1
2019-04-13	2019-04-14	1
2019-04-29	2019-04-29	0
2019-05-15	2019-05-14	1
2019-07-02	2019-07-03	1
2019-01-19	2019-01-19	0

Tabla 6: Fechas sobre las que se ha realizado el experimento. Las fechas estan en formato %YYYY- %mm- %dd.

4.3. Caso de uso 3: Correlaciones entre índices de vegetación y condiciones climatológicas

En este experimento vamos a calcular las correlaciones entre algunos índices de vegetación respecto a las condiciones climáticas que se dieron en la fecha de la medida.

Más concretamente se van a demostrar las siguientes correlaciones:

- NDVI vs. temperatura: Lo esperado sería que a menores temperaturas el valor de NDVI sea mayor, debido a que la zona sobre la que realiza el experimento (Teatinos) no se dan temperaturas extremadamente bajas.
- MOISTURE vs. temperatura: El resultado esperado sería que menores temperaturas mayor sera el valor del índice MOISTURE, que indica la humedad en la vegetación

de una zona.

A continuación se muestran las consultas, resultados y gráficas que demuestran la correlación.

NDVI vs Temperatura

```
PREFIX aemet: <http://aemet.linkeddata.es/ontology/>
PREFIX greensenti: <http://khaos.uma.es/green-senti/earth-observation#>

SELECT ?date ?ndvi ?temp
WHERE {
    ?obs aemet:observedInInterval ?date .
    greensenti:teatinos greensenti:hasNearestStation ?station .
    ?obs aemet:isCapturedBy ?station .
    ?obs aemet:observedProperty aemet:TemperatureAverage .
    ?obs aemet:valueOfObservedData ?temp .

    ?product greensenti:hasDate ?date .
    ?snapshot greensenti:hasProduct ?product .
    ?snapshot greensenti:hasScene greensenti:teatinos .
    ?snapshot rdf:type greensenti:Snapshot .
    ?snapshot greensenti:NDVI ?ndvi .
}
```

Fragmento de código 10: Consulta que devuelve el NDVI y la temperatura para cada fecha sobre la que tenemos datos.

Date	NDVI	Temperature (°C)	Normalizado (Temperatura)
time:20170831	0.10926457	26.2	0.807
time:20180630	0.14262335	24.6	0.807
time:20180623	0.15859586	24.2	0.807
time:20170725	0.14484733	25.4	0.762
time:20171030	0.20216838	19.4	0.423
time:20180921	0.11964925	25.4	0.762
time:20180222	0.1722533	12.2	0.016
time:20180624	0.12424223	25.4	0.762
time:20180703	0.13943355	27.2	0.864
time:20170822	0.13443293	26.6	0.830
time:20180802	0.19970404	26.6	0.830
time:20161220	0.25488728	13.9	0.112

Tabla 7: Subconjunto del resultado de ejecutar a la consulta 10.

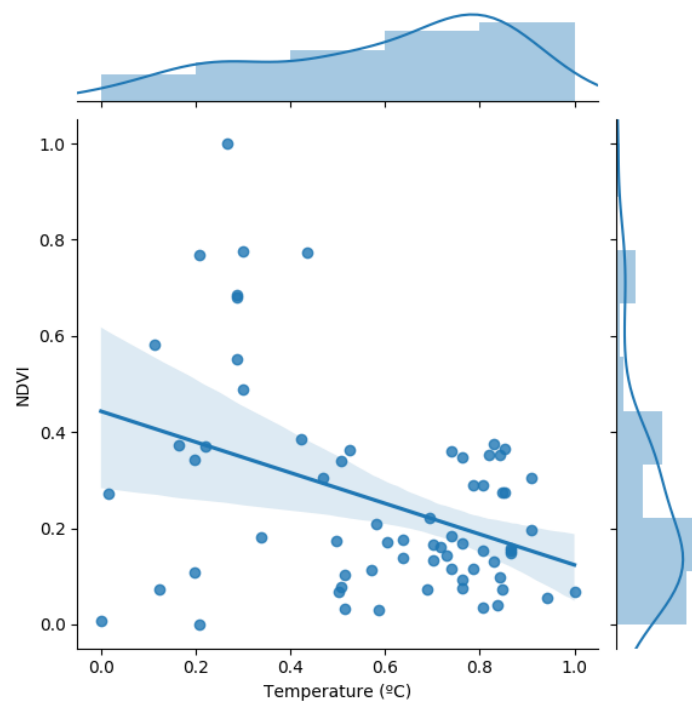


Figura 10: Gráfica que muestra la correlación entre el NDVI y la temperatura. Gráfica generada en Python mediante la librería seaborn.

MOISTURE vs Temperatura

```
PREFIX aemet: <http://aemet.linkeddata.es/ontology/>
PREFIX greensenti: <http://khaos.uma.es/green-senti/earth-observation#>

SELECT ?date ?moisture ?temp
WHERE {
    ?obs aemet:observedInInterval ?date .
    greensenti:teatinos greensenti:hasNearestStation ?station .
    ?obs aemet:isCapturedBy ?station .
    ?obs aemet:observedProperty aemet:TemperatureAverage .
    ?obs aemet:valueOfObservedData ?temp .

    ?product greensenti:hasDate ?date .
    ?snapshot greensenti:hasProduct ?product .
    ?snapshot greensenti:hasScene greensenti:teatinos .
    ?snapshot rdf:type greensenti:Snapshot .
    ?snapshot greensenti:MOISTURE ?moisture .
}
```

Fragmento de código 11: Consulta que devuelve el MOISTURE y la temperatura para cada fecha sobre la que tenemos datos.

Date	MOISTURE	Temperature (°C)	Normalizado (Temperatura)
time:20170831	0.023616796	26.2	0.807
time:20180630	0.013917545	24.6	0.717
time:20180623	-0.011716866	24.2	0.694
time:20170725	0.019771064	25.4	0.762
time:20171030	-0.023959436	19.4	0.423
time:20180921	-0.006686993	25.4	0.762
time:20180222	0.03926526	12.2	0.016
time:20180624	0.016242225	25.4	0.762
time:20180703	0.0167692	27.2	0.864
time:20170822	0.016814524	26.6	0.830
time:20180802	-0.022800846	26.6	0.830
time:20161220	0.13312069	13.9	0.112

Tabla 8: Subconjunto del resultado de ejecutar a la consulta 11.

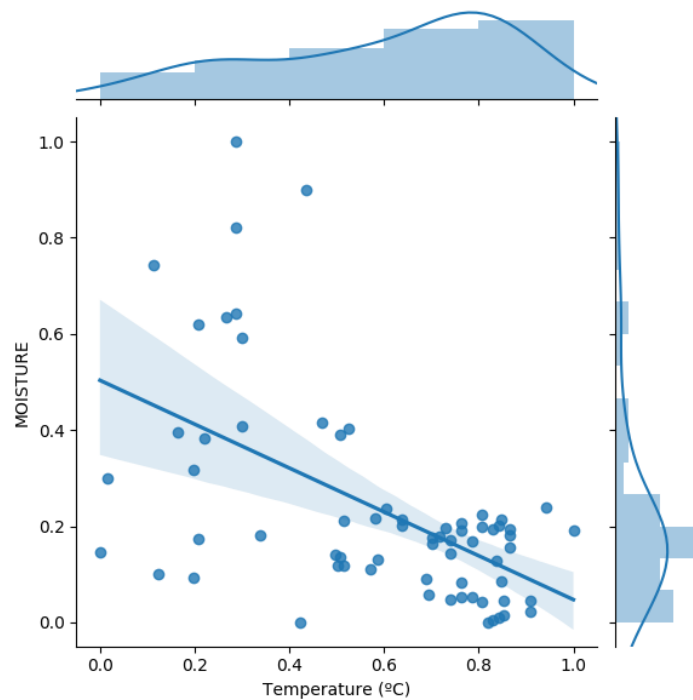


Figura 11: Gráfica que muestra la correlación entre el MOISTURE y las precipitaciones. Gráfica generada en Python mediante la librería seaborn.

Resultados

Las dos gráficas nos dan una información sobre el estado de las plantas en el campus de Teatinos. Ambos índices tienen una correlación inversa, es decir cuando la temperatura aumenta, el valor del índice disminuye. Tanto el índice NDVI como el MOISTURE consiguen sus valores más elevados entre los 15 y los 20 grados, indicándonos que en esa temperatura es cuando las zonas verdes de Teatino tienen mas clorofila y humedad, es decir están más verdes.

Teniendo esta información, es posible predecir el NDVI y estado gracias a las predicciones de la temperatura de la AEMET y generar avisos para el personal técnico que mantiene las zonas verdes.

Los dataset generados en este experimento pueden ser encontrados en el portal Open Data del proyecto Green-Senti ¹⁷.

¹⁷Datasets del experimento sobre las correlaciones entre índices de vegetación y condiciones climatológicas: <https://opendata.khaos.uma.es/dataset/correlation-index-weather>

5. Discusiones

En base a la ontología, los experimentos realizados y los repositorios publicados, se han cumplido los objetivos propuestos al inicio del proyecto, proporcionando una base de conocimiento que engloba todos los datos que forman parte del proyecto Green-Senti. Además, se han proporcionando varios métodos (API Rest y endpoint SPARQL) para que cualquiera pueda acceder a esos datos en un formato homogéneo e integrarlos en sus propios proyectos. Finalmente, se han enlazado los datos con los datos de la AEMET, enriqueciendo los datos del proyecto Green-Senti.

La fase de diseño de la ontología fue la que necesitó más esfuerzo, debido a no haber trabajado en el campo de la Web Semántica antes del inicio del proyecto, necesitando dedicar bastantes horas a familiarizarme con el stack de tecnologías de la Web Semántica. Para el diseño de la ontología me ha sido de gran utilidad lo aprendido en la asignatura de Modelado y Diseño del Software, ya que la mayor parte del proceso de modelado de un sistema puede ser aplicado al diseño de una ontología.

Respecto al campo de Remote Sensing, el trabajar con cientos de productos Sentinel-2 y Landsat 8 se volvió un reto debido a la cantidad de espacio que ocupa cada producto (1.3GB los productos de Sentinel-2 y 1GB los productos Landsat 8 aproximadamente). Lo aprendido en la asignatura de Sistemas Operativos fue muy útil a la hora de realizar scripts Bash¹⁸ que descomprimieran y eliminaran del producto todo lo que no era necesario para ahorrar espacio en disco.

Por último, la realización de este Trabajo de Fin de Grado dentro del grupo de investigación Khaos Research¹⁹ de la Universidad de Málaga me ha permitido conocer el funcionamiento de los grupos de investigación dentro de la universidad y trabajar con miembros del grupo de investigación con amplia experiencia en el campo de la Web Semántica.

¹⁸Bash: <https://www.gnu.org/software/bash/>

¹⁹Khaos Research: <https://khaos.uma.es>

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este Trabajo de Fin de Grado se presenta un módulo semántico para la representación y consolidación de los datos generados por el proyecto Green-Senti en el análisis de imágenes de satélites, siendo además integrados con datos meteorológicos proporcionados por el portal Open-Data de AEMET. Siguiendo la ontología definida, se han convertido todos estos datos de fuentes y formatos heterogéneos a RDF, almacenándolos en un solo repositorio RDF en la plataforma Virtuoso. Todo los resultados han sido también publicados en el CKAN del proyecto Green-Senti, incluyendo ejemplos de consultas SPARQL para acceder a los datos de forma homogénea y sencilla.

Para validar la ontología se han propuesto 3 casos de uso. El primero muestra la fusión entre los datos recogidos por los satélites Sentinel-1 y Sentinel-2, calculando la serie temporal de la zona verde en el campus universitario de Teatinos, permitiendonos comparar los valores de ambos. En el segundo caso de uso se muestra lo fácil que es extender la ontología para la integración de otro satélite, en este caso Landsat 8, y comparar los valores de distintos índices entre Landsat 8 y Sentinel-2. El tercer caso de uso muestra la relación entre distintos índices de vegetación y el clima, utilizando los índices NDVI y MOISTURE y la temperatura proporcionada por el portal Open-Data de AEMET. Todos los casos de uso se han realizado sobre el campus de Teatinos en la Universidad de Málaga.

Como trabajo futuro se pretende integrar más fuentes de datos utilizando la ontología, cada una con todas las propiedades que esa fuente proporciona, como por ejemplo drones u otros satélites, como MODIS o Proba-V. Se destaca la posibilidad de realizar consultas SPARQL avanzadas que permitan alterar los datos en los repositorios RDF. También se podría alinear la ontología con otras ontologías mediante correspondencias entre clases que tengan un significado equivalente y extender los casos de uso en escenario más complejos como el cambio climático.

Referencias

- Bannari Abdou, D. Morin, F. Bonn, and Alfredo Huete. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13:95–120, 01 1996. doi: 10.1080/02757259509532298.
- European Space Agency. Overview. URL http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3.
- Damien Arvor, Laurent Durieux, Samuel Andrés, and Marie-Angélique Laporte. Advances in geographic object-based image analysis with ontologies: A review of main contributions and limitations from a remote sensing perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82:125 – 137, 2013. ISSN 0924-2716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.05.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092427161300124X>.
- Damien Arvor, Mariana Belgiu, Zoe Falomir, Isabelle Mougenot, and Laurent Durieux. Ontologies to interpret remote sensing images: why do we need them? *GIScience & Remote Sensing*, pages 1–29, 03 2019. doi: 10.1080/15481603.2019.1587890.
- Mike Bergman. The fundamental importance of keeping an abox and tbox split. 2009. URL <http://www.mkbergman.com/489/ontology-best-practices-for-data-driven-applications-part-2/>.
- Tim Berners-Lee, James Hendler, and Ora Lassila. The semantic web: A new form of web content that is meaningful to computers will unleash a revolution of new possibilities. *Scientific American*, 05 2001.
- T. Blaschke. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1):2 – 16, 2010. ISSN 0924-2716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271609000884>.
- Thomas Blaschke, Geoffrey J. Hay, Maggi Kelly, Stefan Lang, Peter Hofmann, Elisabeth Addink, Raul Queiroz Feitosa, Freek van der Meer, Harald van der Werff, Frieke van Coillie, and Dirk Tiede. Geographic object-based image analysis – towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87:180 – 191, 2014.

ISSN 0924-2716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.09.014>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271613002220>.

Jun Chen, Ian Dowman, Songnian Li, Zhilin Li, Marguerite Madden, Jon Mills, Nicolas Paparoditis, Franz Rottensteiner, Monika Sester, Charles Toth, John Trinder, and Christian Heipke. Information from imagery: Isprs scientific vision and research agenda. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115:3 – 21, 2016. ISSN 0924-2716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.09.008>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092427161500218X>. Theme issue 'State-of-the-art in photogrammetry, remote sensing and spatial information science'.

Open Geospatial Consortium, a. URL <https://www.opengeospatial.org/standards/geosparql>.

World Wide Web Consortium, b. URL <https://www.w3.org/TR/owl-time/>.

World Wide Web Consortium. Semantic web standard, 2015a. URL <https://www.w3.org/standards/semanticweb/>.

World Wide Web Consortium. Linked data, 2015b. URL <https://www.w3.org/standards/semanticweb/data>.

Python Software Foundation, 2019. URL <https://docs.python.org/3/faq/general.html>.

George Grekousis, Giorgos Mountrakis, and Marinos Kavouras. An overview of 21 global and 43 regional land-cover mapping products. *International Journal of Remote Sensing*, 36(21):5309–5335, 2015. doi: 10.1080/01431161.2015.1093195. URL <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1093195>.

Ontology Engineering Group. URL <http://aemet.linkeddata.es/models.html>.

W3C OWL Working Group. Owl web ontology language reference, 02 2004. URL <https://www.w3.org/TR/owl-ref/>.

W3C OWL Working Group. Owl 2 web ontology language document overview (second edition), 12 2012. URL <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>.

Tom Gruber. *Ontology*. Springer-Verlag, 2009.

Steve Harris and Andy Seaborne. Sparql 1.1 query language, 03 2013. URL <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>.

Natasha F. Noy and Deborah L. McGuinness. *Ontology development 101: A guide to creating your first ontology*. 2001.

Maria Paasivaara and Casper Lassenius. Using iterative and incremental processes in global software development. 2004. doi: 10.1.1.94.2587.

Khaos Research. Proyecto green-senti. URL <http://khaos.uma.es/green-senti>.

Robert A. Schowengerdt. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Academic Press., 2007. ISBN 978-0-12-369407-2.

Guus Schreiber and Yves Raimond. Rdf 1.1 primer, 06 2014. URL <https://www.w3.org/TR/rdf11-primer/>.

Robert Weih and Norman Riggan. Object-based classification vs. pixel-based classification: Comparative importance of multi-resolution imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 38, 01 2010.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

| **uma.es**

E.T.S. DE INGENIERÍA INFORMÁTICA

E.T.S de Ingeniería Informática
Bulevar Louis Pasteur, 35
Campus de Teatinos
29071 Málaga